

Rapport d'étude

Direction Diagnostic et Durabilité des Structures

Recherche de vides par réflectométrie radar au niveau de murs en maçonnerie et caractérisation des pierres

Cathédrale Notre Dame de l'Assomption de Sennez (04)

RAPPORT N° 53483.001.02.A

ARLES, LE 21 JUILLET 2023



REFERENCES DE L'ETUDE

<i>Référence du dossier</i>	53483
<i>Référence du document</i>	53483.001.02.A
<i>Nombre de pages</i>	32
<i>Nombre d'annexes</i>	3
<i>Nombre de rapport COFRAC</i>	0
<i>Référence de la proposition Lerm</i>	PE006755/DSTR
<i>Client</i>	MAIRIE DE SENEZ - Archigem
<i>Référence commande</i>	Notification de marché du 22 novembre 2022

REALISATION

<i>Agence d'Arles</i>	Agence d'Arles 23 rue de la Madeleine CS60136 13631 ARLES CEDEX
<i>Votre correspondant email</i>	Héloïse JOURDAN heloise.jourdan@setec.com
<i>Téléphone</i>	04 86 52 65 43

REVISION DU DOCUMENT

Indice	Date	Nature des modifications
A	21/07/2023	Création du document
B		
C		

VALIDATION DU DOCUMENT

Indice	Rédaction	Vérification et approbation
A	Héloïse JOURDAN Ingénieure d'études	François MARTIN Directeur des Agences
B		
C		

DIFFUSION DU DOCUMENT

Destinataire	Format du document
Archigem - Stefania GUIDUCCI atelier.gem@gmail.com	pdf
Lerm - Agence d'Arles heloise.jourdan@setec.com	pdf

Ce dossier a été réalisé dans une entreprise dont le système de management de la qualité est certifié ISO 9001 par AFAQ/AFNOR Certification.

SOMMAIRE

1 -	OBJET DE L'ÉTUDE	4
2 -	PROGRAMME DE L'ÉTUDE	4
3 -	ESSAIS SUR SITE	5
	3.1 Contexte de réalisation des mesures et prélèvements	5
	3.2 Localisation des prélèvements	6
	3.3 Résultats des mesures par réflectométrie radar	11
4 -	IDENTIFICATION DES ÉCHANTILLONS	17
5 -	ESSAIS EN LABORATOIRE	19
	5.1 Répartition des essais	19
	5.2 Examen pétrographique	19
	5.3 Sédimentométrie	20
	5.4 Analyses des phases argileuses par diffraction des rayons X	21
	5.5 Sels solubles	22
	5.6 Détermination du coefficient de capillarité	22
	5.7 Dilatation linéaire	23
	5.8 Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte	23
	5.9 Mesure de la résistance mécanique à la compression	24
	5.10 Essais de gel dégel	24
6 -	SYNTHÈSE ET CONCLUSION	25
	ANNEXE 1 : DIFFRACTOGRAMMES DES PHASES ARGILEUSES	27
	ANNEXE 2 : REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES DES RÉSULTATS D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITÉ	29
	ANNEXE 3 : REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES RÉSULTATS DE DILATATION LINÉAIRE	31

1 - OBJET DE L'ETUDE

À la demande d'Archigem et pour le compte de la mairie de Senez, le LERM a été chargé, en février 2023, d'une étude visant à rechercher les vides de la maçonnerie et de caractériser les pierres de la Cathédrale Notre Dame de l'Assomption de Senez (04).

Ce rapport vient en complément de celui transmis en avril 2023 et intègre les résultats des essais de gélivité sur pierre.

2 - PROGRAMME DE L'ETUDE

Les essais sur site et en laboratoire sont présentés ci-après. La présence de 3 types de pierre au lieu de 1 type initialement prévu a conduit, en accord avec Archigem, à mener les essais en laboratoire sur 2 types de pierre. Le nombre de corps d'épreuve s'en est retrouvé diminué pour les essais.

Essais sur site :

- Recherche de vides par mesures radar (antenne moyenne et/ou basse fréquence, 400-500 et 800 MHz) au niveau de murs en maçonnerie sur 5 zones de 1m de large et 3m de haut (zone d'environ 3m²), situées entre 1m et 4m d'élévation,
- Prélèvements par carottage diamanté sous eau.

Essais en laboratoire :

- Etude pétrographique sur lame mince d'une roche,
- Quantification des argiles par sédimentométrie à la pipette d'Andreasen,
- Analyse des phases argileuses par diffraction des rayons X,
- Détermination de la teneur en sels solubles (chlorures, sulfates, nitrates,) après extraction aqueuse de 72h selon le principe de la norme NF EN 16455,
- Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte selon le principe de la norme NF EN 1936,
- Mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité selon le principe de la norme NF EN 1925,
- Essai de dilatation linéaire par absorption d'eau selon le mode opératoire II - 7 des recommandations Rilem,
- Mesure de la résistance en compression selon le principe de la norme NF EN 1926,
- Essai de gélivité selon le principe de la norme EN 12371.

3 - ESSAIS SUR SITE

3.1 Contexte de réalisation des mesures et prélèvements

Les investigations sur site et les prélèvements ont été réalisés sur la cathédrale de Senez le 2 février 2023 par une équipe du Lerm.



Fig. 1 : Vue aérienne de la cathédrale de Senez (Google Maps)



Fig. 2 : Illustration de la cathédrale de Senez

Conformément au programme préétabli, les essais sur site ont consisté en l'auscultation radar de cinq zones à l'aide d'une large gamme de fréquences ayant pour objectif d'obtenir le meilleur compromis possible entre résolution et profondeur d'investigation. Les mesures ont été réalisées selon des profils parallèles espacés de 50 cm et sur une hauteur d'inspection de 3 m de haut sur chaque zone définie par le bureau d'études en amont de l'intervention.

Plusieurs faciès de pierres de couleurs différentes ont été identifiés (vert, gris et beige/rougeâtre). Trois types de pierres ont été prélevés par analyse contre un initialement prévu. Les prélèvements ont été effectués en présence du cabinet Archigem.



Fig. 3 : Illustration des différents faciès de pierre

3.2 Localisation des prélèvements

La localisation des prélèvements numérotés 53483-1 à 8 sont présentés sur la figure ci-après. Ils sont schématisés par une représentation de carotte dont la couleur correspond à la teinte de la pierre (vert, gris et beige/rougeâtre). Les empreintes de carottages sont illustrées par les figures 5 à 12.

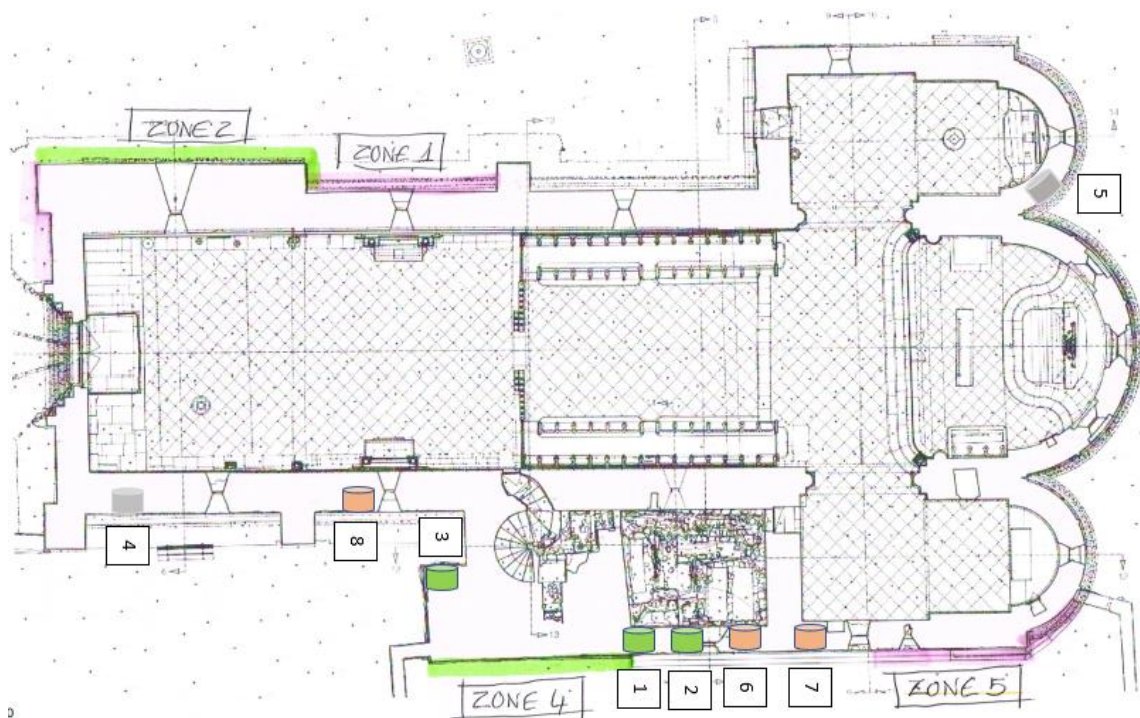


Fig. 4 : Implantation des prélèvements



Fig. 5 : Localisation des prélèvements 53483-1, 2, 6 et 7



Fig. 6 : Localisation des prélèvements 53483-1 et 2 – pierre verte

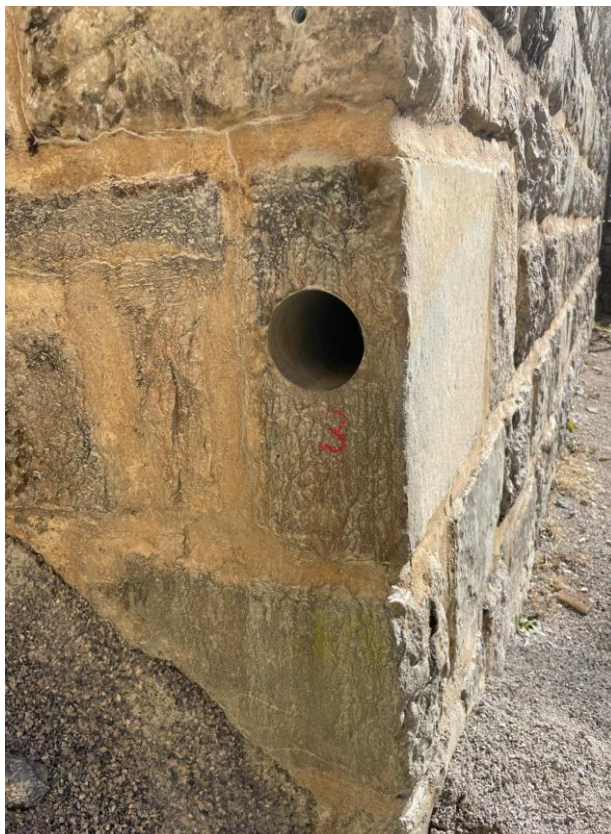


Fig. 7 : Localisation du prélèvement 53483-3 – pierre verte



Fig. 8 : Localisation du prélèvement 53483-4 – pierre grise



Fig. 9 : Localisation du prélèvement 53483-5 – pierre grise



Fig. 10 : Localisation du prélèvement 53483-6 – pierre beige (rougeâtre)



Fig. 11 : Localisation du prélèvement 53483-7 – pierre beige (rougeâtre)



Fig. 12 : Localisation du prélèvement 53483-8 – pierre beige (rougeâtre)

3.3 Résultats des mesures par réflectométrie radar

Les résultats des mesures par réflectométrie radar sont présentés sur les planches ci-après sous forme de cartographies d'amplitude des signaux radar reportées sur photographies après repositionnement, recalage en distance, traitement numérique, filtrage et amplification des signaux radar.

Ces planches présentent respectivement les cartographies des signaux radar intégrés jusqu'à 50 cm environ et dans la tranche 50-150cm de profondeur.

Un extrait de profil de radargramme présenté sur chacune des zones permettant de définir l'épaisseur et un exemple des éventuelles anomalies détectés.

La figure ci-après illustre la localisation des zones auscultées.

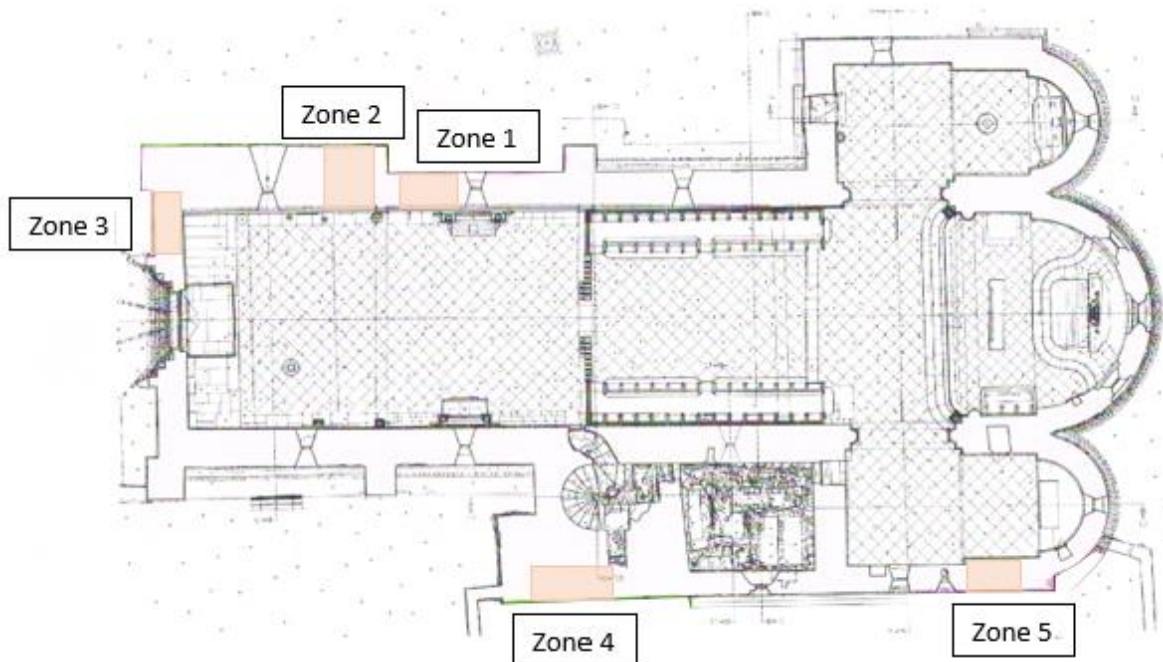
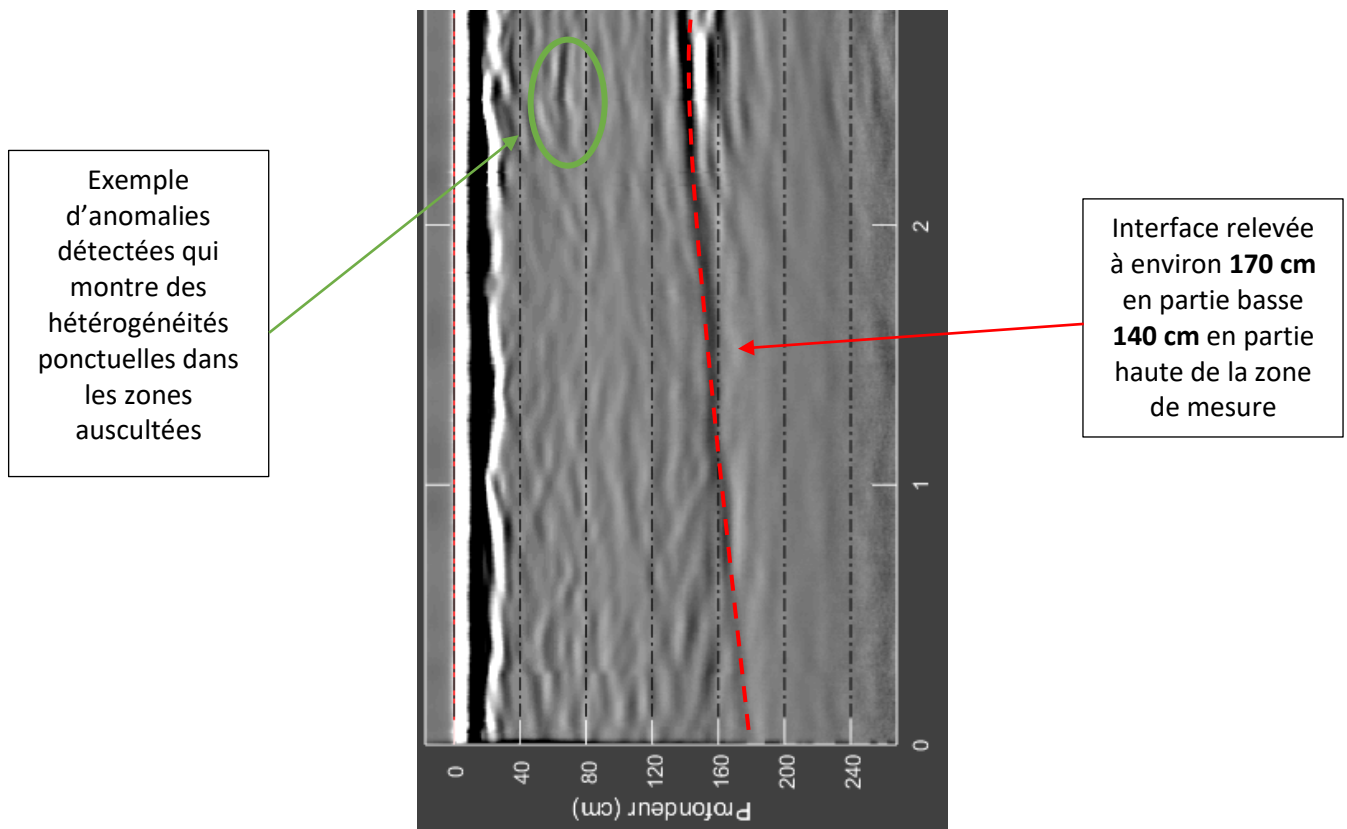
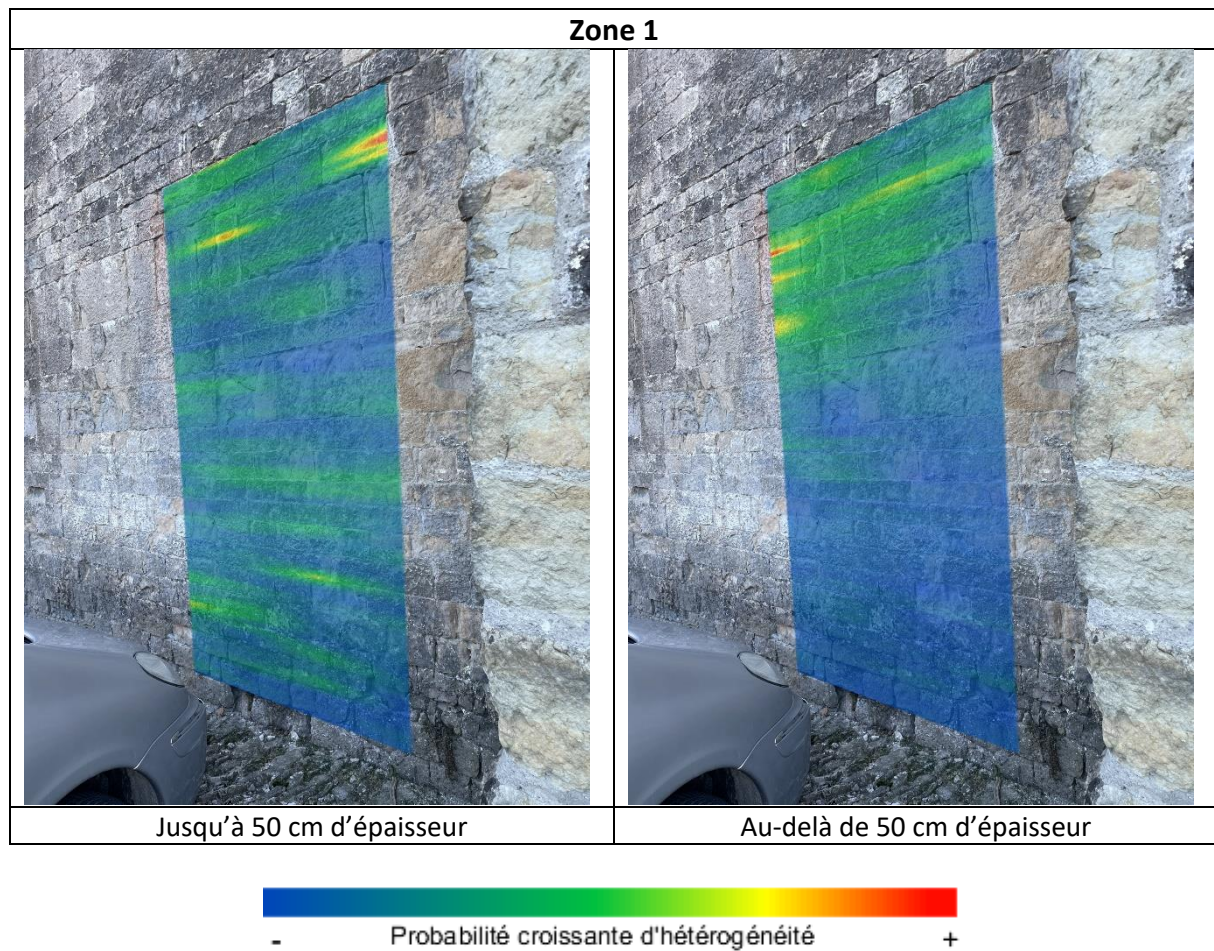


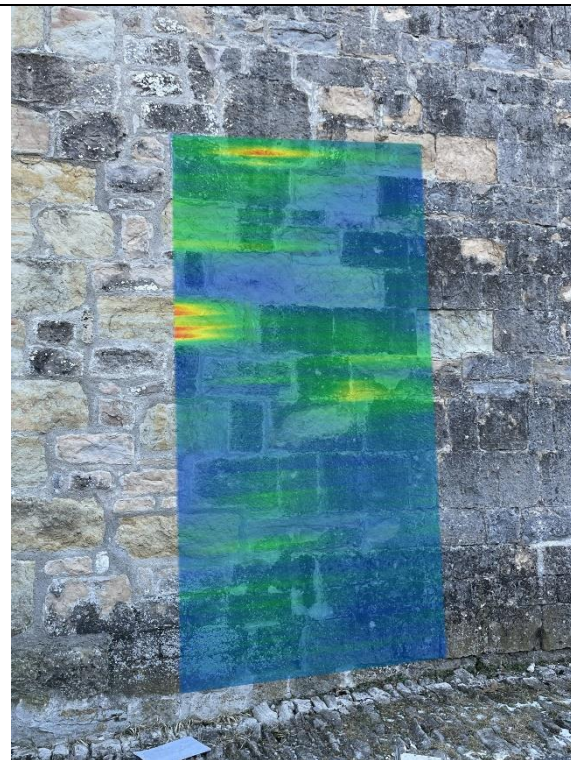
Fig. 13 : Implantation des zones auscultées



Zone 2



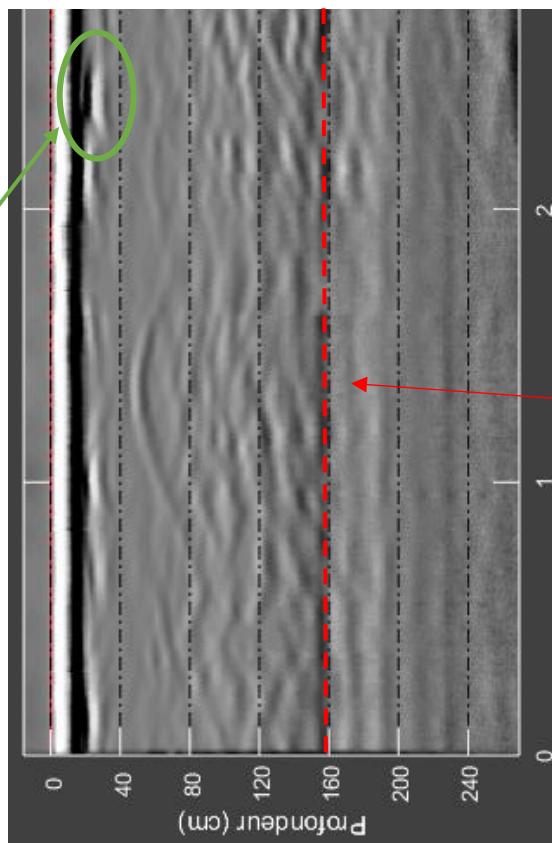
Jusqu'à 50 cm d'épaisseur



Au-delà de 50 cm d'épaisseur



Exemple
d'anomalies
détectées qui
montre des
hétérogénéités
ponctuelles dans
les zones
auscultées



Interface sub
horizontale vers

160 cm.

Au-delà la signature
radar ne permet pas
de déterminer avec
précision un
doublement de mur

Zone 3



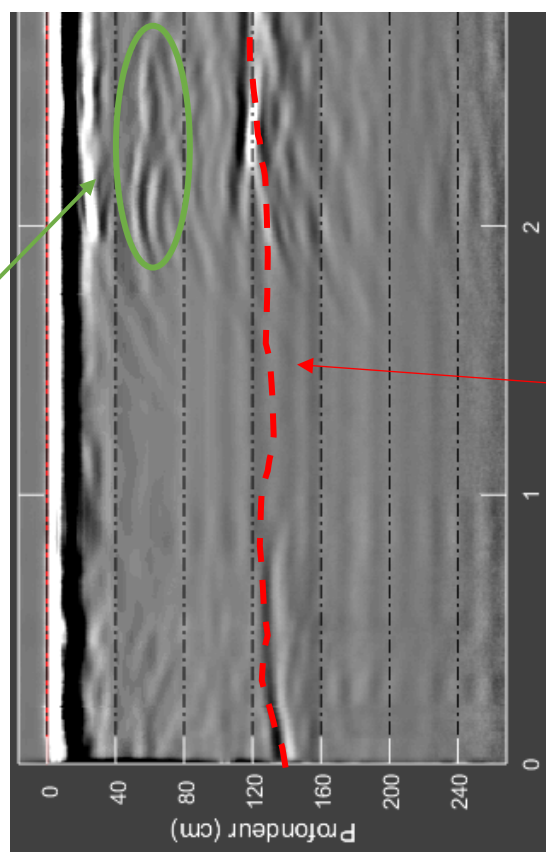
Jusqu'à 50 cm d'épaisseur



Au-delà de 50 cm d'épaisseur



Exemple
d'anomalies
détectées qui
montre des
hétérogénéités
ponctuelles dans
les zones
auscultées

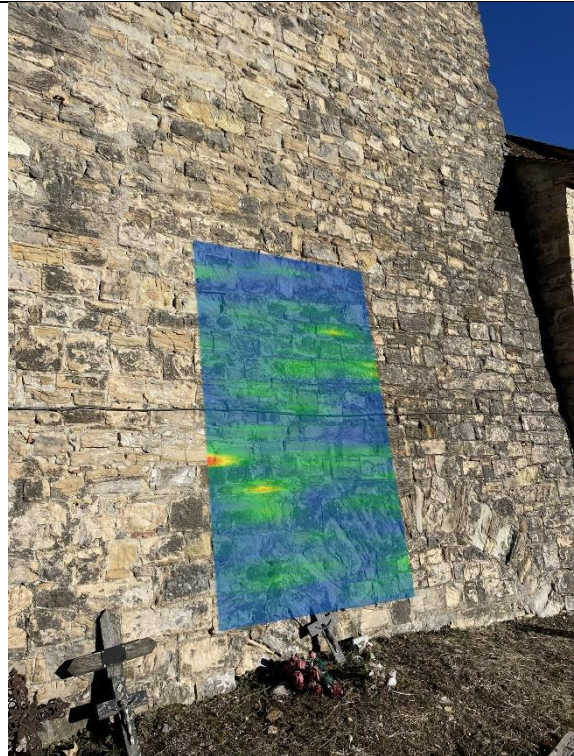


Interface relevée
vers 120 / 130 cm.

Zone 4



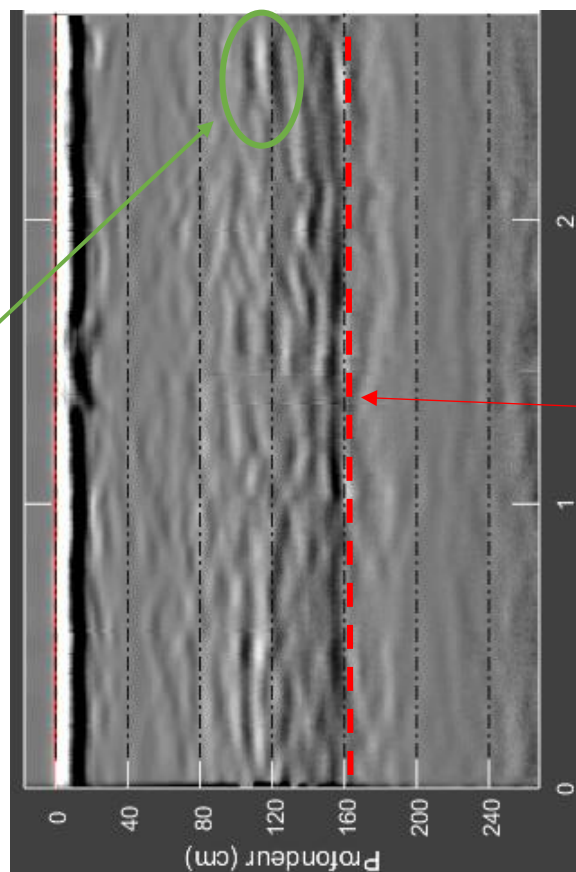
Jusqu'à 50 cm d'épaisseur



Au-delà de 50 cm d'épaisseur



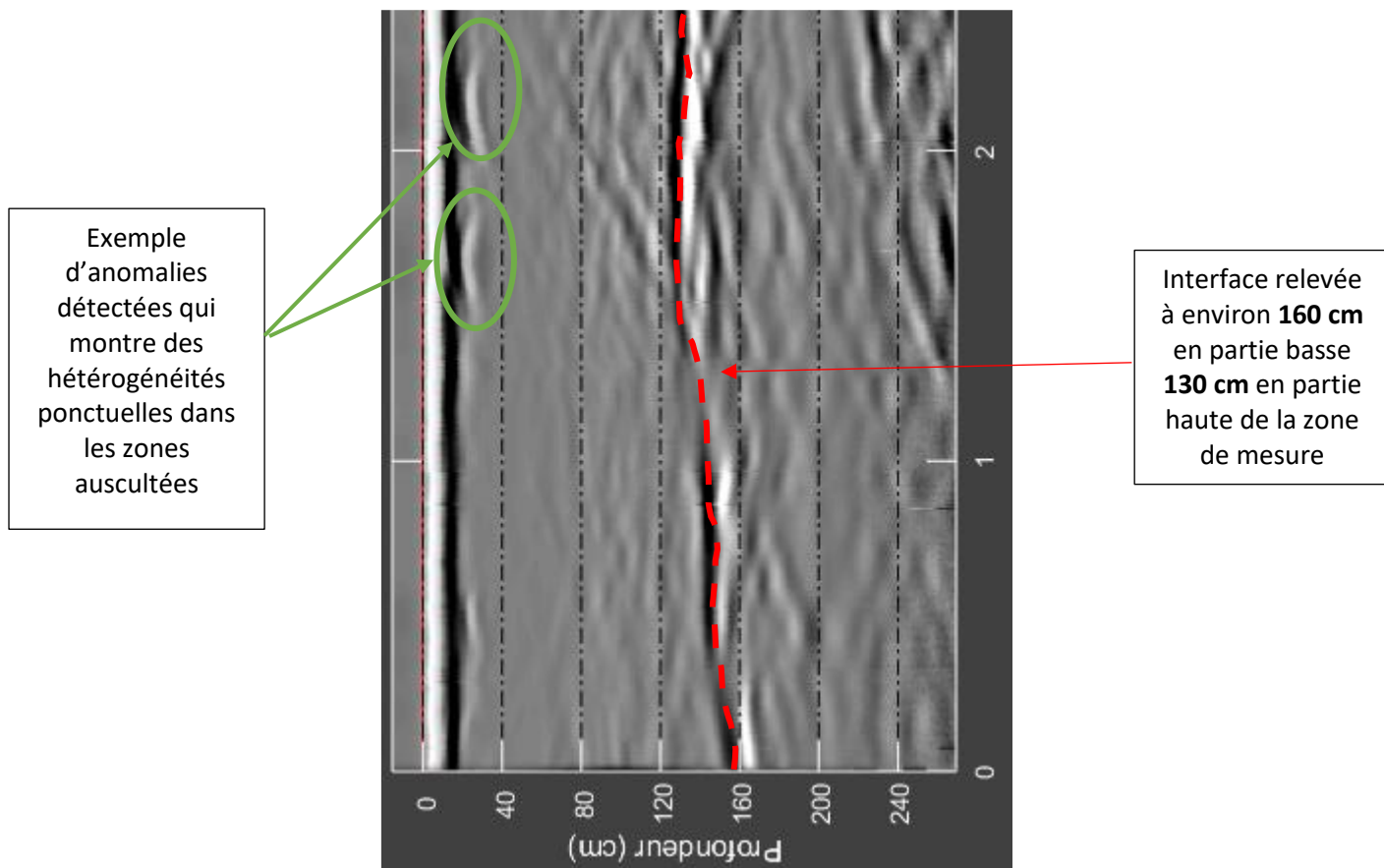
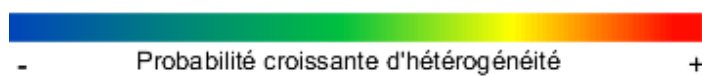
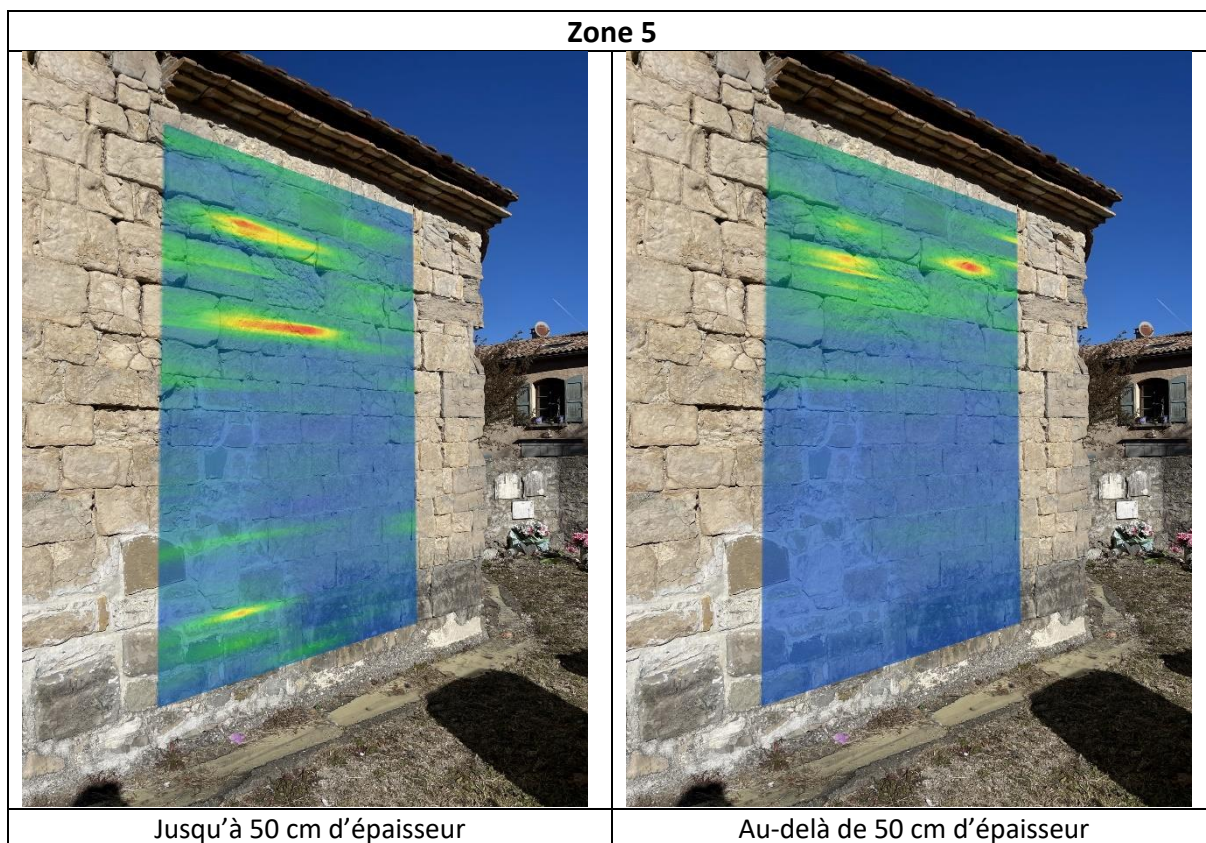
Exemple
d'anomalies
détectées qui
montre des
hétérogénéités
ponctuelles dans
les zones
auscultées



Interface sub
horizontale vers

160 cm.

Au-delà la signature
radar ne permet pas
de déterminer avec
précision un
doublement de mur
ou d'une cavité.



Le traitement des données a permis de détecter une interface représentant l'épaisseur de murs qui varie de 120 à 170 cm suivant les zones d'études.

- En zone 2 et 4 : interface sub-horizontale à 160 cm.
- En zone 1 et 5 : interface variable (160 /170 cm en pied et 120 /130 cm en partie haute de la zone d'étude) avec une **épaisseur plus importante en pied de mur**.
- En zone 3 : interface relativement linéaire avec une épaisseur de mur de 120 à 130 cm environ.

Ces cartographies mettent en évidence la présence d'hétérogénéités très ponctuelles sur chaque zone à divers degrés et plus prononcé sur les zones 3 et 5.

Réf. Zones	Interface relevée (épaisseur estimée)	Observations
Zone 1	Entre 140 et 170 cm	Hétérogénéités très ponctuelles détectées dans les zones auscultées
Zone 2	160 cm	
Zone 3	Entre 120 et 130 cm	
Zone 4	160 cm	
Zone 5	Entre 130 et 160 cm	

Tableau 1 : Tableau synthétique des auscultations radar

4 - IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS

Le Tableau 2 donne les références et les principales caractéristiques des échantillons prélevés par le LERM le 2 février 2023. Ces échantillons sont par ailleurs illustrés par les figures 14 à 17.

Réf. LERM	Type de pierre
53483-1	Pierre verte
53483-2	
53483-3	
53483-4	Pierre grise
53483-5	
53483-6	Pierre beige (rougeâtre)
53483-7	
53483-8	

Tableau 2 : Identification des échantillons



Fig. 14 : Illustration des échantillons 53483-1 et -2

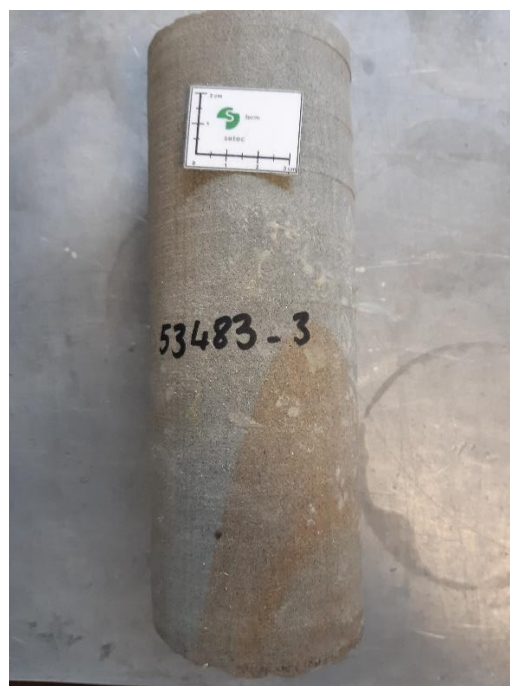


Fig. 15 : Illustration de l'échantillon 53483-3



Fig. 16 : Illustration des échantillons 53483-4 et -5



Fig. 17 : Illustration des échantillons 53483-6, -7 et -8

5 - ESSAIS EN LABORATOIRE

5.1 Répartition des essais

Le tableau 3 ci-après présente la répartition des essais selon les échantillons. Les échantillons de pierre de couleur grise n'ont pas été caractérisés en accord avec Archigem. En raison de la modification du programme de prélèvement des pierres, les essais de « porosité », « capillarité », « dilatation linéaire » et « résistance mécanique à la compression » ont été réalisés sur un même corps d'épreuve.

Nature de la pierre	Réf. LERM	Examen pétrographique	Porosité	Capillarité	Résistance mécanique	Dilatation linéaire	Sédimentométrie	DRX	Gélinivité	Sels solubles
Vert	53483-1		x	x	x	x				
	53483-2	x					x	x		x (2)
	53483-3								x	
Grise	53483-4									
	53483-5									
Beige	53483-6	x					x	x		x (2)
	53483-7		x	x	x	x				
	53483-8								x	

Tableau 3 : Répartition des essais

5.2 Examen pétrographique

L'examen au microscope optique en lumière transmise d'une lame mince confectionnée à partir des échantillons 53483-1 et 6, a permis de mettre en évidence les points essentiels suivants (Fig. 18 à Fig. 21) :

Concernant l'échantillon 53483-1 (pierre verte) :

- L'échantillon provient d'une roche massive siliceuse détritique composée majoritairement de grains de quartz et de feldspaths subanguleux liés par un ciment calcaro-argileux correspondant à un grès. Des grains de micas ainsi que des nodules de glauconie sont disséminés entre les grains de quartz. La porosité est relativement faible. A la manipulation, l'échantillon apparaît légèrement pulvérulent.
- Les grains sont moyennement triés, avec un fuseau granulaire allant de 50 à 150 µm. La matrice calcaire semble représenter plus de 15% de l'échantillon.
- Selon ces observations, le grès semble appartenir à la **classe des grauwaacke (classification de Folk 1974)**.

Concernant l'échantillon 53483-6 (pierre beige) :

- L'échantillon est très semblable à l'échantillon précédent, il s'en distingue par une meilleure cohésion (peu pulvérulent) et un rapport grain de quartz/ciment calcaire plus élevé. On retrouve également des nodules de glauconie ainsi que des micas disséminés dans cet échantillon.
- Selon ces observations, le grès semble appartenir à la **classe des grauwacke (classification de Folk 1974)**.

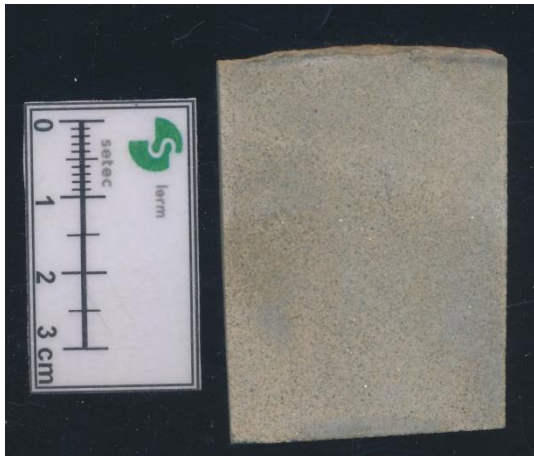


Fig. 18 : Photographie macroscopique de l'échantillon

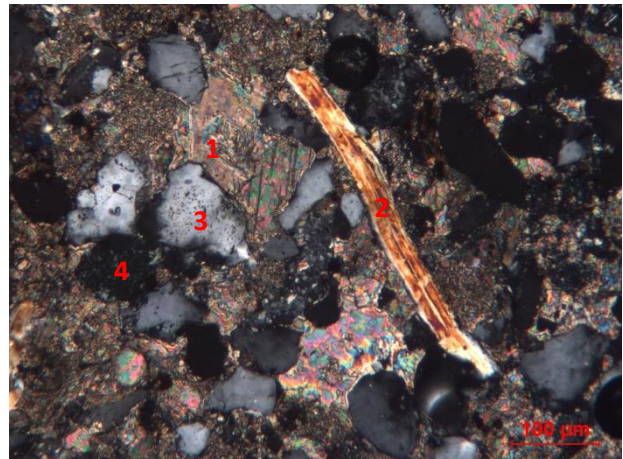


Fig. 19 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 53483-1 – Aspect général
1 : ciment calcaire, 2 : mica, 3 : quartz, 4 : glauconie



Fig. 20 : Photographie macroscopique de l'échantillon

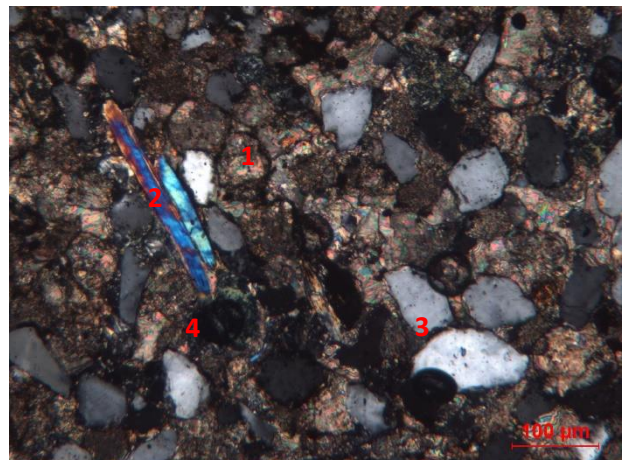


Fig. 21 : Microscopie optique en lumière transmise. LPA
Echantillon 53483-6 – Aspect général
1 : ciment calcaire, 2 : mica, 3 : quartz, 4 : glauconie

5.3 Sédimentométrie

La détermination de la quantité d'argiles (particules $< 2 \mu\text{m}$) contenues dans les échantillons de pierre 53483-2 et 6 a été effectuée selon le principe de la norme X31-107 par sédimentométrie à l'aide de la pipette d'Andreasen.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 4.

Réf. LERM	53483-2	53483-6
Type de pierre	Vert	Beige
Quantité de particules argileuses	9,9	9,7

Tableau 4 : Quantités de particules argileuses dans les échantillons de pierre **53483-2 et 6**

5.4 Analyses des phases argileuses par diffraction des rayons X

L'analyse des espèces argileuses a été effectuée par diffraction des rayons X sur deux plaquettes orientées. Ces plaquettes sont préparées à partir de la phase argileuse ($\leq 2 \mu\text{m}$) extraite d'échantillons représentatifs selon la méthode proposée par T. Holtzapfel (SGN Pub. n° 12, 1985).

La proportion de chaque espèce dans le cortège argileux est exprimée en pourcentage massique ($\pm 5 \%$), afin de demeurer dans un domaine de précision compatible avec la méthode.

Les résultats obtenus en pourcentage massique sont présentés dans le Tableau 5. Les diffractogrammes sont présentés en Annexe 1.

Réf. LERM	53483-2	53483-6
Type de pierre	Vert	Beige
Illite	30%	85%
Kaolinite	10%	15%
Smectite	60%	nd
TOTAL (fraction argileuse)	100%	100%

Tableau 5 : Composition de la fraction argileuse des échantillons **53483-2 et 6**
nd : non détectée

L'observation de ces résultats montre la présence de smectites dans l'échantillon 53483-2. Les smectites sont des argiles à propriétés gonflantes pouvant provoquer à moyen ou long terme l'altération de la pierre selon les conditions environnementales.

Le Tableau 6 ci-dessous présente le pourcentage de la fraction argileuse dans chacun des échantillons, sur la base des résultats obtenus par sédimentométrie.

Réf. LERM	53483-2	53483-6
Type de pierre	Vert	Beige
Illite	3,0	8,2
Kaolinite	1,0	1,5
Smectite	5,9	-
Total	9,9	9,7

Tableau 6 : Pourcentages des espèces argileuses contenues dans les échantillons de pierre **53483-2 et 6**

5.5 Sels solubles

Les dosages en anions ont été réalisés, après extraction aqueuse, par chromatographie ionique selon le principe de la norme NF EN 16455 sur des poudres des échantillons 53483-2a et 2b et 6a et 6b.

Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Type de pierre	Réf. LERM	Profondeur (mm)	Dosage en Cl ⁻ (%massique)	Dosage en NO ₃ ⁻ (%massique)	Dosage en SO ₄ ²⁻ (%massique)
Vert	53483-2a	0-15	< 0,01	< 0,01	0,63
	53483-2b	15-30	< 0,01	< 0,01	0,02
Beige	53483-6a	0-15	< 0,01	< 0,01	0,94
	53483-6b	15-30	< 0,01	< 0,01	0,01
Valeurs limites du fascicule technique « Ouvrages de maçonnerie »			≤ 0,1	≤ 0,5	< 0,1

Tableau 7 - Dosage des sels solubles dans les échantillons de pierre **53483-2 et 6** à deux profondeurs

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

- les valeurs indiquées en rouge sont supérieures aux valeurs seuils pour lesquelles le fascicule technique « Ouvrages de maçonnerie » édité par le Ministère de la Culture en juin 2006 recommande un dessalement,
- les échantillons ne contiennent pas de chlorures ni de nitrates,
- la teneur en sulfates dans les 15 premiers millimètres de la surface est élevée, notamment dans l'échantillon 53483-6a de la pierre beige.

5.6 Détermination du coefficient de capillarité

La mesure du coefficient d'absorption d'eau par capillarité a été réalisée sur une éprouvette de pierre découpée (cube de 5 cm d'arête) dans les échantillons 53483-1 et 7 selon le principe de la norme NF EN 1925. Les mesures réalisées en fonction du temps ainsi que les courbes représentatives de l'absorption d'eau sont présentées en Annexe 2. Les coefficients de capillarité pour chacune des éprouvettes sont regroupés dans le Tableau 8.

Réf. LERM	Type de pierre	Coefficient de capillarité (g.m ⁻² .s ^{-0,5})
53483-1	Vert	17,4
53483-7	Beige	2,4

Tableau 8 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité des échantillons de pierre **53483-1 et 7**

Les coefficients de capillarité sont faibles. Les courbes représentatives présentées en annexe indiquent également une faible capacité d'absorption d'eau.

5.7 Dilatation linéaire

La mesure de la dilatation linéaire a été réalisée sur une éprouvette de pierre découpée (cubes de 5 cm d'arête) dans les échantillons 53483-1 et 7 selon le mode opératoire II - 7 des recommandations Rilem « Dilatation linéaire par absorption d'eau ».

Les courbes de dilatation linéaire sont présentées en Annexe 3. Les coefficients de dilatation linéaire à 72h pour chacune des éprouvettes sont regroupés dans le Tableau 9.

Réf. LERM	Type de pierre	Coefficient de dilatation linéaire (mm/m)
53483-1	Vert	1,94
53483-7	Beige	0,25

Tableau 9 : Coefficient de dilatation linéaire des échantillons de pierre 53483-1 et 7

Le coefficient de dilatation linéaire de l'échantillon 53483-1 est relativement élevé. Cela peut s'expliquer par la présence d'une fine fissure observée en partie supérieure du corps d'épreuve.

5.8 Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité ouverte

La porosité ouverte et la masse volumique apparente ont été mesurées sur une éprouvette de pierre découpée (cube de 5 cm d'arête) dans les échantillons 53483-1 et 7 selon par absorption d'eau sous vide et pesée hydrostatique selon le mode opératoire de la norme NF EN 1936. La masse volumique apparente, exprimée en kg/m³, est égale au quotient de la masse de l'échantillon sec (m_s) et de la différence entre la masse imbibée (m_i) et la masse dans l'eau (m_e) :

$$Mv_{app.} = \frac{m_s}{m_i - m_e} \cdot \rho_{eau}$$

La porosité ouverte (%) est calculée par la relation ci-après :

$$Po = 100 \cdot \frac{m_i - m_s}{m_i - m_e}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 10.

Réf. LERM	Type de pierre	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Porosité ouverte (%)
53483-1	Vert	2470	8,4
53483-7	Beige	2510	6,0

Tableau 10 : Masse volumique apparente et porosité ouverte des échantillons 53483-1 et 7

La porosité ouverte de ces échantillons de pierre, comprise entre 6 et 9 % est faible.

5.9 Mesure de la résistance mécanique à la compression

La mesure de la résistance mécanique en compression a été réalisée sur une éprouvette de pierre découpée (cube de 5 cm d'arête) dans les échantillons 53483-1 et 7 selon le principe de la norme NF EN 1926.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 11.

Réf. LERM	Type de pierre	Charge maximale (kN)	Résistance à la compression (MPa)
53483-1	Vert	143	55,7
53483-7	Beige	243	96,5

Tableau 11 : Résistance mécanique à la compression des échantillons de pierre **53483-1 et 7**

La résistance mécanique à la compression de l'échantillon 53483-7 est élevée. Celle de l'échantillon 53483-1 est moindre mais cela peut s'expliquer par la fine fissure observée en partie supérieure du corps d'éprouve.

5.10 Essais de gel dégel

L'essai de gel, réalisé sur les échantillons référencés 53483-3 et 8, est effectué selon le mode opératoire de la norme EN 12371. Il consiste en une succession de cycles de gel dans l'air et de dégel dans l'eau.

Deux critères permettent d'apprécier l'action des cycles de gel/dégel sur les éprouvettes :

- mesure du module d'élasticité dynamique : certaines altérations telles que les microfissures sont susceptibles de le faire évoluer. L'altération de l'éprouvette est effective lorsqu'il y a diminution d'au moins 30 % du module d'élasticité dynamique par rapport au module d'élasticité dynamique initial E_0 ,
- observation visuelle : la norme EN 12371 donne 5 niveaux d'altération : 0, 1, 2, 3 et 4, avec :
 - 0 : éprouvette intacte,
 - 1 : dommage très mineur (arrondissement mineur des angles et arêtes) qui ne compromet pas l'intégrité de l'éprouvette,
 - 2 : une ou quelques petites fissures (de largeur $\leq 0,1$ mm) ou détachement de petits fragments (≤ 30 mm² par fragment),
 - 3 : une ou plusieurs fissures, trous ou détachements de fragments plus importants que ceux définis pour la note 2 ou altération du matériau à l'endroit des veines où l'éprouvette présente des signes conséquents de désagrégation ou dissolution,
 - 4 : éprouvette comportant d'importantes fissures, cassées en deux ou plus, ou désagrégée.

L'altération de l'éprouvette est effective lorsque le niveau 3 est atteint.

Le nombre de cycles retenu est celui pour lequel au moins 2 éprouvettes sont considérées comme altérées selon l'un des critères suivants :

- la diminution du module d'élasticité dynamique atteint 30 %,
- la note attribuée à l'examen visuel atteint 3.

Les résultats obtenus au moment de l'arrêt de l'essai sont regroupés dans le Tableau 12 présenté ci-après.

Réf. LERM	Type de pierre	Nombre de cycles	Critère prédominant pour l'arrêt de l'essai		
			Variation de volume (en %)	Variation de E (en %)	Observations visuelles
53483-3	Vert	144	0,64	0	Niveau 1
53483-8	Beige	144	0,93	1	Niveau 0

Tableau 12 : Résultats de l'essai de gélivité des échantillons **53483-3 et 8**

Ces différentes mesures et/ou observations permettent d'établir un nombre de cycles de gel minimum avant altération de 144 cycles.

6 - SYNTHÈSE ET CONCLUSION

L'étude réalisée par le LERM, de février à juillet 2023, dans le but de rechercher les vides dans la maçonnerie et de caractériser les pierres de la Cathédrale Notre Dame de l'Assomption de Senez (04), a permis de dégager les points essentiels suivants :

- trois types de pierre ont été observées sur site (vert, gris et beige/rougeâtre). Les analyses en laboratoire ont été réalisées sur les pierres verte et beige,
- les auscultations par réflectométrie radar ont mis en évidence :
 - des hétérogénéités ponctuelles indicatives de murs relativement bien jointés,
 - des murs d'environ 1,2 à 1,6 mètres d'épaisseur,
 - l'absence de cavité, qui était notamment soupçonnée au pied du clocher (zone 4).
- les analyses en laboratoire ont permis de mettre en évidence :
 - que les pierres verte et beige sont des **grès** pouvant s'apparenter à des **grauwacke** selon la classification de Folk (1974). Concernant les pierres de substitution possibles, le grès de Senez dont provient probablement les échantillons n'est plus exploité. Le **grès Gris-blanc de Lohr** ainsi que le **Gris-Rouge de Lohr** issue des carrières Rauscher (Vosges) semblent les plus proches visuellement des échantillons,
 - la présence d'argile dans les deux pierres étudiées, et notamment d'**argile gonflante de type smectite** dans la pierre verte. La quantité de smectite présente dans l'échantillon de pierre verte a été estimée à environ 6 %,
 - la **présence de sulfates** en quantité relativement importante jusqu'à 15 mm de profondeur dans les échantillons de pierre. Ces teneurs (respectivement d'environ 0,6 % pour la pierre verte et d'environ 0,9 % pour la pierre beige) sont supérieures au seuil de 0,1 % pour lesquelles le fascicule technique « Ouvrages de maçonnerie » édité par le Ministère de la Culture en juin 2006 qui recommande alors un dessalement,
 - l'absence de chlorures et de nitrates,
 - une résistance élevée des pierres au gel, avec un minimum de 144 cycles de gel-dégel atteint (valeur maximale demandée par le mode opératoire de la norme EN 12371), qui est à mettre en relation avec une porosité ouverte et un coefficient de capillarité faibles,

- les caractéristiques pétro-physiques des pierres de cette étude synthétisées dans le tableau ci-dessous. Elles montrent que ces pierres sont **physiquement compatibles** avec leur **utilisation dans la maçonnerie**, et ce même **dans une commune dont le gel est qualifié de modéré à sévère** selon la norme NF B 10-601.

Réf. LERM	53483-1	53483-7
Type de pierre	Vert	Beige
Masse volumique apparente moyenne (kg/m ³)	2470	2510
Porosité ouverte moyenne (%)	8	6
Coefficient de capillarité (g.m ⁻² .s ^{-0,5})	17*	2
Coefficient de dilatation linéaire (mm/m)	2*	0,3
Résistance à la compression moyenne (MPa)	56*	97
Nombre de cycles de gel-dégel	144	144

Tableau 13 : Comparaison des caractéristiques pétro-physiques des pierres verte et beige
 * présence d'une fine fissure observée en partie supérieure du corps d'épreuve

En conclusion, sur la base des analyses et essais réalisés, il apparaît que :

- les maçonneries sont relativement homogènes et ne présentent pas de pertes de mortier de joint généralisées,
- les pierres verte et beige étudiées présentent des caractéristiques physiques compatibles avec leur utilisation en maçonnerie dans une zone soumise à du gel modéré voire sévère (résistance mécanique et au gel élevée, porosité faible, comportement à l'eau relativement peu impacté). Cependant, la présence de sulfates en frange surfacique peut conduire à la délitescence observée à la surface des pierres. La présence naturelle d'argiles gonflantes de type smectite dans la pierre verte peut également provoquer la fragilisation à cœur de la pierre à long terme.

Héloïse JOURDAN
Ingénieur d'études

H. JOURDAN

François MARTIN
Directeur des agences

F. MARTIN

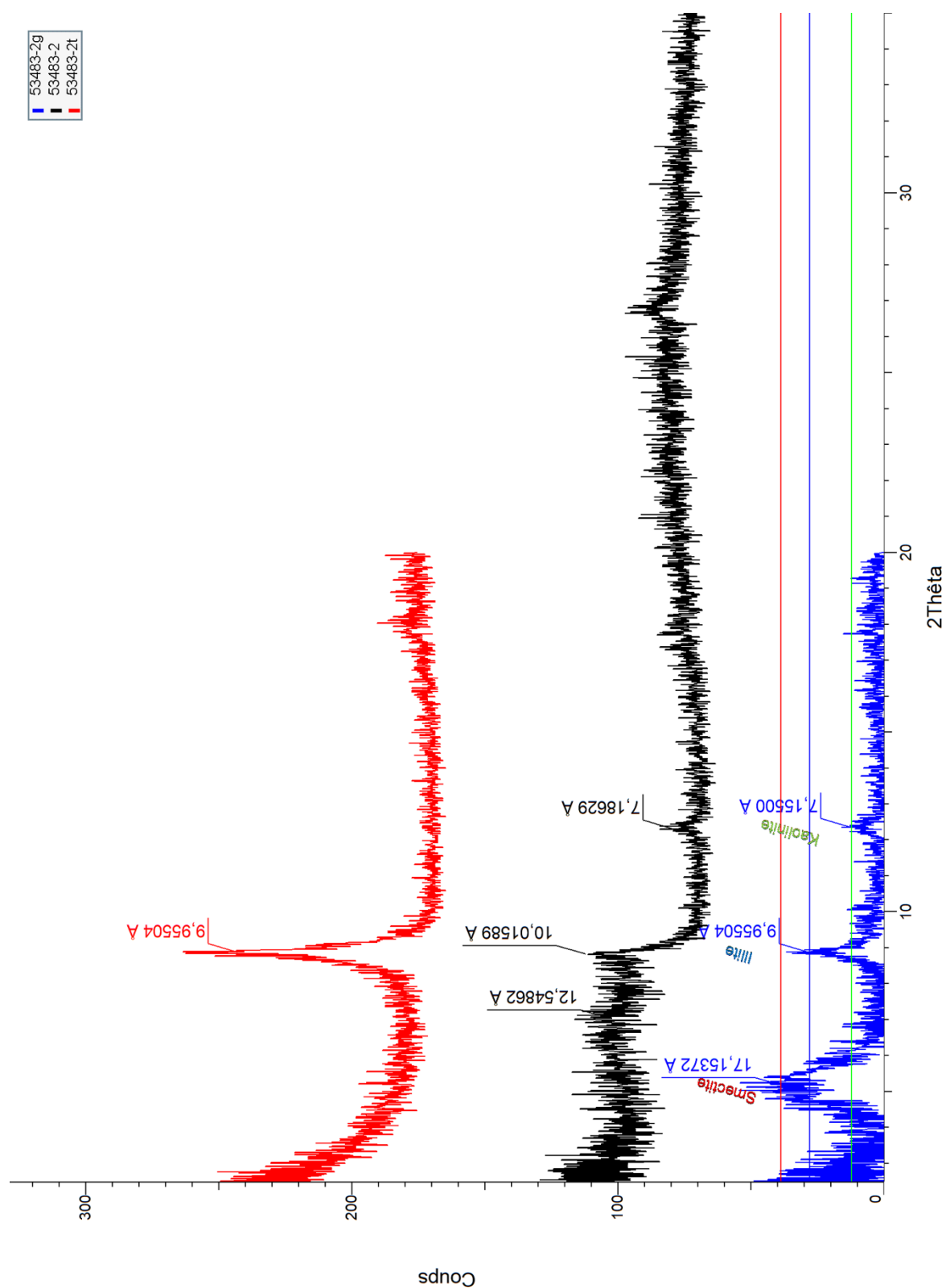
Investigations sur site réalisées par J. DEGARDIN et F. BOUDIGNION
 Essais physiques réalisés par F. PETIT et P. BROQUIN
 Examens pétrographiques réalisés par F. BÈGUE
 Analyses chimiques réalisées par M. BECCHIS

La reproduction intégrale de ce rapport sans modification d'aucune sorte est seule autorisée.

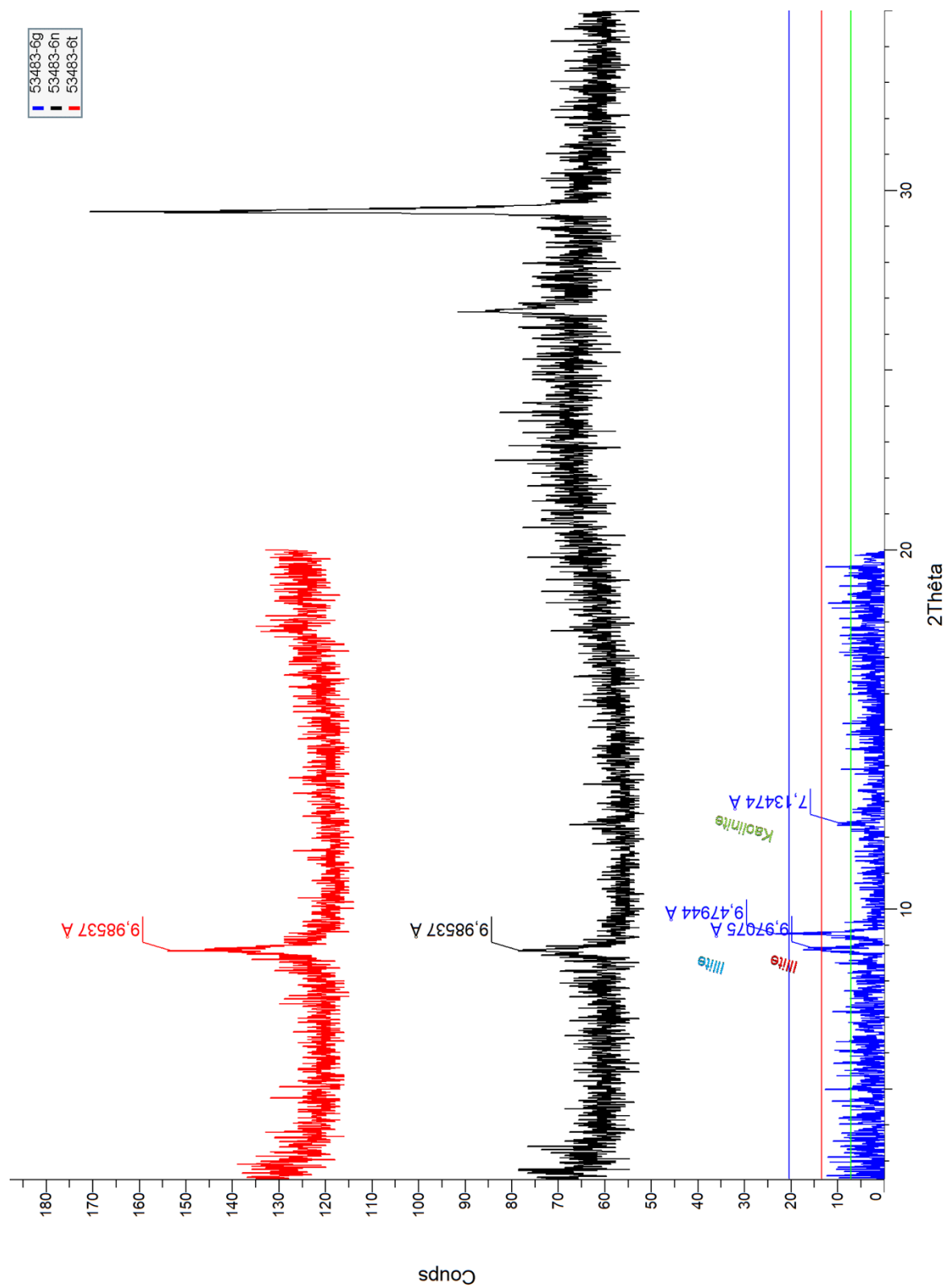
Les essais faisant l'objet du présent rapport portent sur des échantillons prélevés dans certaines conditions. Leur représentativité est liée à celle des échantillons et ne peut être étendue à une population dont ils sont issus que si l'homogénéité de cette population peut être vérifiée.

ANNEXE 1 : DIFFRACTOGRAMMES DES PHASES ARGILEUSES

Échantillon 53483-2



Échantillon 53483-6

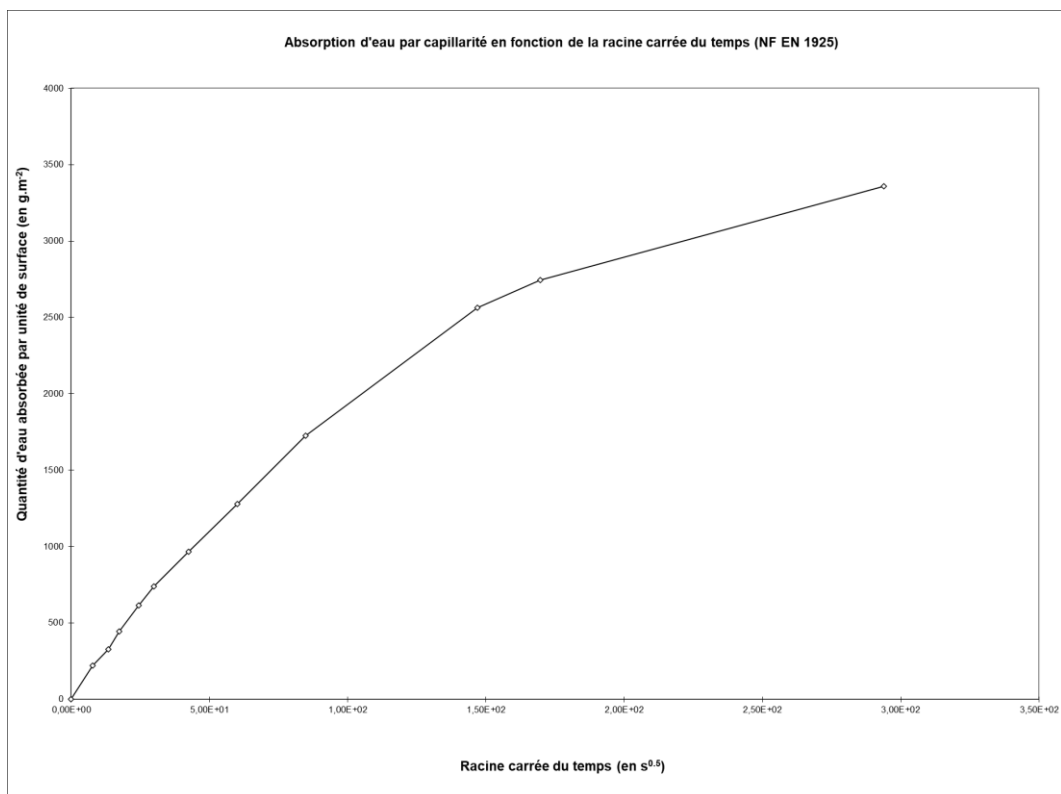


ANNEXE 2 : REPRESENTATIONS GRAPHIQUES DES RESULTATS D'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE

Échantillon 53483-1 (pierre verte)

Temps (en min)	Masse (en g)	$(M_i - M_d)/A$ (en g.m ⁻²)
0	313,26	0
1	313,89	222
3	314,19	327
5	314,52	443
10	315,01	615
15	315,36	739
30	316,01	967
60	316,89	1277
120	318,17	1727
360	320,55	2564
480	321,06	2743
1440	322,81	3359

Prise de masse en fonction du temps

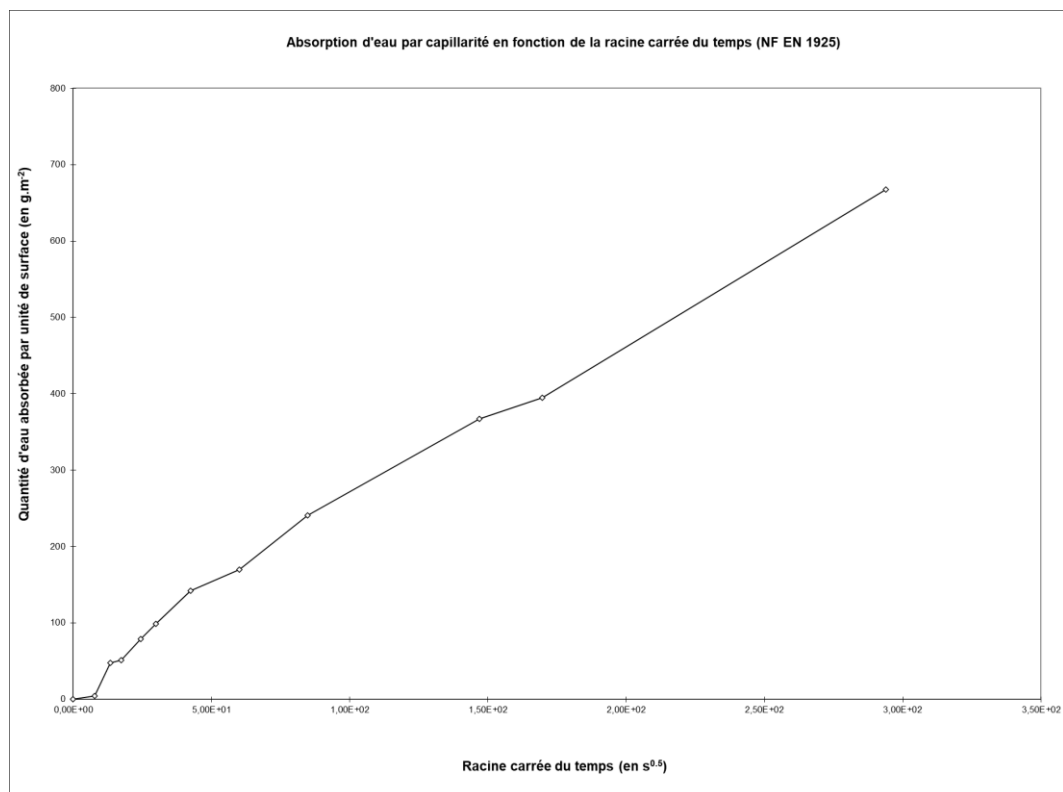


Courbe représentative de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de la racine carrée du temps

Échantillon 53483-7 (pierre beige)

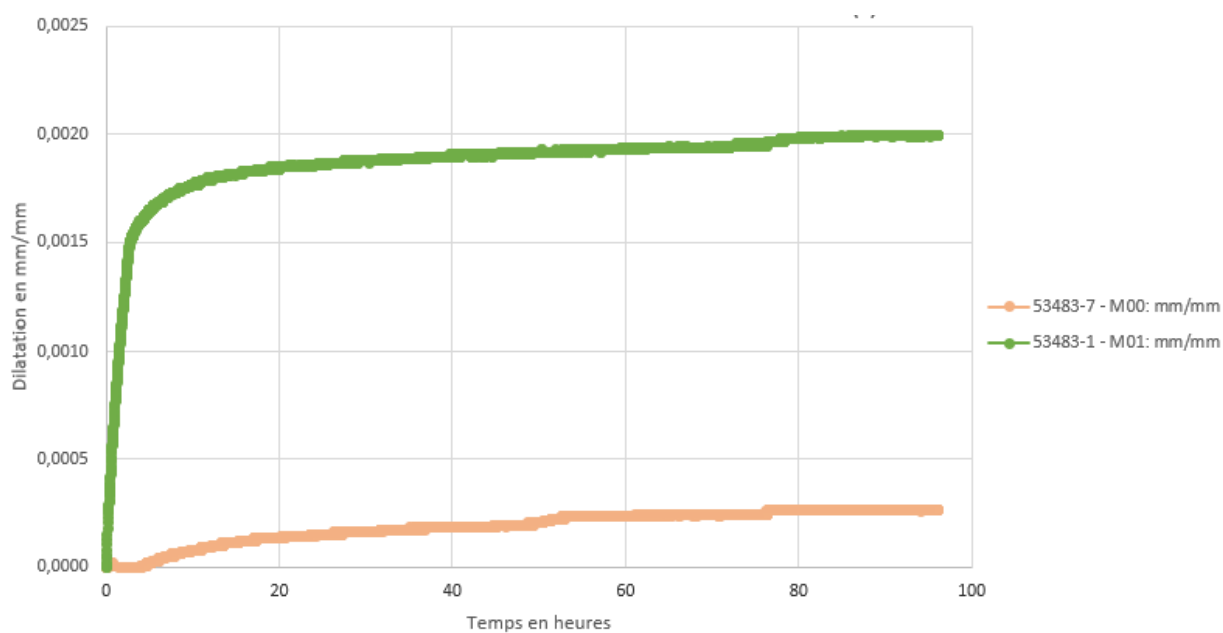
Temps (en min)	Masse (en g)	$(M_i - M_d)/A$ (en g.m ⁻²)
0	319,79	0
1	319,80	4
3	319,91	47
5	319,92	51
10	319,99	79
15	320,04	99
30	320,15	142
60	320,22	170
120	320,40	241
360	320,72	367
480	320,79	395
1440	321,48	668

Prise de masse en fonction du temps



Courbe représentative de l'absorption d'eau par capillarité en fonction de la racine carrée du temps

ANNEXE 3 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS DE DILATATION LINEAIRE



**Siège Social et laboratoires**

23 rue de la Madeleine
CS 60136
13631 ARLES CEDEX
FRANCE

Tél +33 4 86 52 65 00
Fax +33 4 90 96 25 27
lerm.contact@setec.com

Agence de Paris

Immeuble Central Seine
42 - 52 quai de la Rapée
CS 71230
75583 PARIS CEDEX 12
FRANCE

Tél +33 1 82 51 41 00
Fax +33 4 90 96 25 27

Agence de Lyon

679, rue Le Chatelier
Lot N° 66
38090 VAULX-MILIEU
FRANCE

Tél +33 4 86 52 65 00
Fax +33 4 90 96 25 27

Agence de Rennes

4 avenue Charles Tillon
35000 RENNES
FRANCE

Tél +33 2 99 45 46 05
Fax +33 4 90 96 25 27

Agence de Toulouse

Bâtiment Les Oliviers
445, L'Occitane
31670 LABEGE
FRANCE

Tél +33 5 61 72 28 09
Fax +33 4 90 96 25 27

